

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 11-274474

(43)Date of publication of application : 08.10.1999

(51)Int.Cl.

H01L 29/778
H01L 21/338
H01L 29/812
H01L 33/00
H01S 3/18

(21)Application number : 10-069617

(71)Applicant : NIPPON TELEGR & TELEPH
CORP <NTT>

(22)Date of filing : 19.03.1998

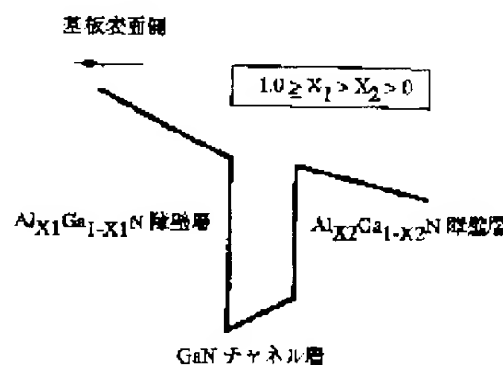
(72)Inventor : MAEDA, YUKIHIKO
KOBAYASHI NAOKI
NISHIDA TOSHIO

(54) SEMICONDUCTOR DEVICE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To improve the performance of a high electron mobility transistor having a hetero structure of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, made of a compound semiconductor, having a hetero structure channel, having extra-high power and extra-high withstand voltage, and intended for high speed and high frequency, by effectively utilizing a large piezo-effect produced by the hetero structure in designing a device structure.

SOLUTION: This semiconductor device is a high electron mobility transistor having a double hetero structure including a substrate side barrier layer made of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ manufactured on a substrate, a channel layer made of GaN or InGaN, and a barrier layer made of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ of the substrate surface side, wherein the Al composition of the barrier layer of the substrate surface side is larger than that of the barrier layer of the substrate side. Further, the thickness of the channel layer and the thickness of the barrier layer of the substrate surface side are in a range producing no lattice relaxation.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 22.01.2001

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2000 Japanese Patent Office

The Japanese Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. **** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

DETAILED DESCRIPTION

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[The technical field to which invention belongs] this invention relates to the field-effect transistor which consists of a compound semiconductor for the high-speed RFs of the super-high power and super-high pressure-proofing which has a hetero structure channel.

[0002]

[Description of the Prior Art] Since the HEMT (HEMT) "AlXGa1-XN/GaN HEMT" which has AlXGa1-XN/GaN hetero structure has the high ionization by collision energy of GaN which high two-dimensional concentration of electrons is obtained by the big conduction band discontinuity (it is about 2.1eV by aluminum composition X= 1.0) in AlXGa1-XN/GaN hetero structure, and serves as a channel layer (about 5.3eV), the high power and the quantity pressure-proofing operation which exceeds GaAs system HEMT are possible for it. In here, the very big piezo electric field effect resulting from the grid mismatching between an AlXGa1-XN layer and GaN layer exists in AlXGa1-XN/GaN hetero structure. For this reason, for the further highly-efficient-izing of AlXGa1-XN/GaN HEMT, it is indispensable to take the piezo electric field effect into consideration in a device design, and implementation of new HEMT device structure where this effect was used is needed.

[0003]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] In HEMT which has AlXGa1-XN/GaN hetero structure, the purpose of this invention takes into consideration the big piezo electric field effect produced along with this hetero structure in a device design, and is in the place which achieves highly efficient-ization of a field-effect transistor which consists of a compound semiconductor for the high-speed RFs of the super-high power and super-high pressure-proofing which has a hetero structure channel according to the new device structure which used this effect effectively.

[0004]

[Means for Solving the Problem] In order to attain the above-mentioned purpose, this invention is considered as a configuration like the publication to a claim. That is, this invention uses aluminum composition of the barrier layer by the side of the above-mentioned substrate front face as the semiconductor device greatly constituted from aluminum composition of the barrier layer by the side of the above-mentioned substrate in the HEMT which has the double hetero structure constituted including the barrier layer by the side of the channel layer which consists of the barrier layer, GaN, or InGaN by the side of the substrate which consists of AlXGa1-XN according to claim 1 produced on the substrate like, and the substrate front face which consists of AlXGa1-XN. Thus, AlXGa1-XN/GaN of the both sides by the side of a substrate front face [in double hetero structure in this invention], and a substrate. Or the piezoelectric effect in an AlXGa1-XN/InGaN hetero interface is used. By reducing effectively the two-dimensional electron-distribution width of face in GaN or InGaN channel, and increasing aluminum composition X of the AlXGa1-XN layer by the side of a substrate front face Since prevention or concentration of electrons can be increased, a decrement of the concentration of electrons accompanied by reduction of the above-mentioned channel width Consequently, HEMT which has the parvus high concentration two-dimensional electron of electron-distribution width of face is realizable, and an aspect ratio is high and it is effective in high highly efficient HEMT of a mutual conductance (gm) being

obtained. Moreover, let this invention be the semiconductor device made into the domain according to claim 2 from which the thickness of a channel layer and the barrier layer by the side of a substrate front face does not produce grid relief in the claim 1 like. Thus, by setting the thickness of a channel layer and the barrier layer by the side of a substrate front face as the thickness which grid relief does not produce, the effect of a piezo charge is acquired effectively and it is effective in highly efficient HEMT being realizable. Moreover, let this invention be a semiconductor device in the layer-structure condition field of the domain surrounded by line A according to claim 3 the combined condition of the composition difference of aluminum composition of the barrier layer by the side of a substrate front face and aluminum composition of the barrier layer by the side of a substrate and the thickness of the barrier layer by the side of the above-mentioned substrate front face is indicated to be to drawing 11 in the claim 1 or the claim 2 like, line B, line C, line D, and curvilinear E. Thus, by using the layer-structure condition field shown in drawing 11, an aspect ratio is high and there is an effect which can produce easily high highly efficient HEMT of a mutual conductance (gm) by the high yield.

[0005] $\text{AlX}_1\text{Ga}_{1-x_1}\text{N}/\text{GaN}/\text{AlX}_2\text{Ga}_{1-x_2}\text{N}$ whose drawing 11 is this invention It is what shows the layer-structure condition field in the layer structure ($0 < x_2 < x_1 \leq 1$) of HEMT. On an axis of ordinate, the aluminum composition X_1 of $\text{AlX}_1\text{Ga}_{1-x_1}\text{N}$ barrier layer by the side of a substrate front face. In the rectangular coordinates system which took aluminum composition difference ($x_1 - x_2$) with the aluminum composition X_2 of $\text{AlX}_2\text{Ga}_{1-x_2}\text{N}$ barrier layer by the side of a substrate, and took the thickness (dB1) of $\text{AlX}_1\text{Ga}_{1-x_1}\text{N}$ barrier layer by the side of a substrate front face along the quadrature axis the segment to the crossover (a) of aluminum composition difference ($x_1 - x_2$) 0.9 of an axis of ordinate, and thickness (dB1) 100** of the barrier layer of a quadrature axis -- with A Curvilinear E which shows the limitation of grid relief of the thickness (dB1) of the above-mentioned barrier layer from the above-mentioned crossover (a) to the crossover (b) of aluminum composition difference ($x_1 - x_2$) 0.2 of an axis of ordinate, and thickness (dB1) 500** of the barrier layer of a quadrature axis, the perpendicular segment from the above-mentioned crossover (b) to a quadrature-axis top -- D and the segment to 0.9 of an axis of ordinate -- the segment to 500** of B and a quadrature axis -- the structure which exists in the layer-structure condition field surrounded by C is used [0006] In $\text{AlXGa}_{1-X}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT of this invention, by reducing the distribution width of face of the two-dimensional electron gas in a channel, it is effective to improve an aspect ratio and to increase a mutual conductance (gm), and, for that, it is advantageous to use the double hetero structure where GaN channel layer with narrow width of face was inserted by two $\text{AlXGa}_{1-X}\text{N}$ barrier layers because of the further highly-efficient-izing. However, in case reduction of channel width reduces GaN channel width, it is effective [reduction], since it generally leads a decrement of the two-dimensional concentration of electrons in which an induction is possible to a channel to aim at prevention or increase of concentration of electrons for a decrement of the above-mentioned concentration of electrons by enlarging conduction band discontinuity of a hetero interface more by increasing aluminum composition X of an $\text{AlXGa}_{1-X}\text{N}$ barrier layer. On the other hand, in $\text{AlXGa}_{1-X}\text{N}/\text{GaN}$ hetero structure, when [resulting from the lattice strain between an $\text{AlXGa}_{1-X}\text{N}$ layer and GaN layer] the big piezo electric field effect exists very much and grid relief has not arisen at all, in aluminum composition $X = 1.0$, the positive or negative, very big piezo charge of $3 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ arises in a hetero interface. For this reason, in case $\text{AlXGa}_{1-X}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT is designed, even if it is ** in usual single hetero structure HEMT and it is in the case of double hetero structure HEMT of the above, it is indispensable to take the piezo electric field effect into consideration by any case. The piezoelectric effect in the $\text{AlXGa}_{1-X}\text{N}/\text{GaN}$ hetero interface of the both sides by the side of the substrate front face in double hetero structure and a substrate is used for this invention. By reducing effectively the two-dimensional electron-distribution width of face in GaN channel, and increasing aluminum composition X of the $\text{AlXGa}_{1-X}\text{N}$ layer by the side of a substrate front face Prevention or concentration of electrons is increased in a decrement of the concentration of electrons accompanied by reduction of GaN channel width, as a result, highly efficient $\text{AlXGa}_{1-X}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT which has the parvus high concentration two-dimensional electron of electron-distribution width of face is realized, and the above-mentioned technical problem is solved.

[0007] The conceptual diagram of the potential structure of double hetero structure HEMT by this

invention is shown in the drawing 1 and the drawing 2. Drawing 1 is a conceptual diagram of the potential structure of double hetero structure HEMT "AlX1Ga1-x1N/GaN/AlX2Ga1-x2N HEMT" ($0 < x_1, x_2 \leq 1$) by this invention. the point that the aluminum composition X1 of AlX1Ga1-x1N barrier layer by the side of the point that the big piezo electric field effect by the lattice strain exists also in any of two barrier layer interfaces which, as for the fundamental characteristic feature of the potential structure of drawing 1, GaN channel layer adjoins, and a substrate front face is larger than the aluminum composition X2 of AlX2Ga1-x2N barrier layer by the side of a substrate -- it comes out Drawing 2 is a conceptual diagram of the potential structure of double hetero structure HEMT "AlX1Ga1-x1N/InYGa1-YN/AlX2Ga1-x2N HEMT" ($0 < x_1, x_2 \leq 1, 0 < Y \leq 1$) by this invention, and when InYGa1-YN ($0 < Y \leq 1$) is used as a channel layer, it applies this invention shown in drawing 1. The fundamental characteristic feature of the potential structure of drawing 2 is completely the same as the fundamental characteristic feature of the potential structure of drawing 1. Drawing 3 - view 8 uses and explains an operation of the potential structure by this invention shown in above-mentioned view 1 and the drawing 2. First, an operation of the piezo electric field effect in this invention is explained using the drawing 3 and the drawing 4. Double hetero structure AlXGa1-XN/GaN/AlXGa1-XN when the piezo electric field effect presupposes virtually that drawing 3 is not existed at all The potential configuration of HEMT and the mode of a distribution of a two-dimensional electron are shown typically. Compared with single hetero structure HEMT usual in double hetero structure HEMT, the advantageous mode is shown in drawing 3 by reduction of channel **** with the point of getting electron-distribution width of face being reduced. Double hetero structure AlXGa1-XN/GaN/AlXGa1-XN in case, as for drawing 4, the big piezo electric field effect by the lattice strain exists also in any of two barrier layer interfaces which GaN channel layer adjoins The potential configuration of HEMT and the mode of a distribution of a two-dimensional electron are shown typically. As a result of an electron's being able to draw near to a substrate front-face side, a mode that electron-distribution width of face is reduced is shown to drawing 4 by the strong electric field by the both sides of the negative piezo charge produced in the positive piezo charge produced in the substrate front-face side hetero interface, and the substrate side hetero interface. Thus, it is possible to promote reduction of the distribution width of face of a two-dimensional electron by using the piezo electric field effect effectively according to double hetero structure. Although the misfit trusion will occur in the interface of a substrate and a thin film more than by it bordering on the so-called critical thickness and grid relief will arise if a thickness is increased when forming the thin film in which grid mismatching exists to a substrate, generally, grid relief advances imperfectly and a fixed lattice strain remains. Therefore, although the effect of a piezo charge can be acquired based on the technical thought of the invention in this application even if it adopts the thickness exceeding the critical thickness, more effectively, it is desirable to hold down the thickness of a channel layer and the barrier layer by the side of a substrate front face to below a critical thickness. Next, an operation of the obstruction effect of the substrate front-face side AlXGa1-XN barrier layer in this invention is shown using the drawing 5 and the drawing 6. Single hetero structure AlXGa1-XN/GaN in case, as for drawing 5, the piezo electric field effect exists In HEMT, it is what showed typically change of the potential configuration when increasing aluminum composition X of an AlXGa1-XN barrier layer, and a mode that a more high-concentration two-dimensional electron can make an AlXGa1-XN obstruction high by increase of aluminum composition X so that an induction may be possible is shown. In drawing 5, aluminum composition X of an AlXGa1-XN barrier layer is carrying out [that it can increase and] critical-value $X = X_{HS}$, without introducing the misfit trusion into an AlXGa1-XN/GaN hetero interface. drawing 6 -- double hetero structure AlX1Ga1-x1 -- pass critical-value $X = X_{HS}$ [in drawing 5 for aluminum composition X of AlX1Ga1-x1N barrier layer by the side of a substrate front face] ($X_{HS} < X_{HD}$) from $x_1 = x_2 = X_L$ to $x_1 = X_{HD}$ in N/GaN/AlX2Ga1-x2NHEMT -- change of the potential configuration at the time of making it increase is shown typically The mode which aluminum composition X1 of AlX1Ga1-x1N barrier layer by the side of a substrate front face is made larger than critical-value $X = X_{HS}$ for the crystal lattice of GaN layer in double hetero structure being distorted by the AlX2Ga1-x2N layer by the side of a substrate, and can carry out it like $x_2 = X_{HD} > X_{HS}$ in the single hetero structure of drawing 5 is shown in drawing 6. Thus, it is possible to

depend to the two-dimensional electron of GaN channel layer, and to realize the high obstruction effect by making aluminum composition X1 of AlX1Ga1-x1N barrier layer by the side of a substrate front face larger than the aluminum composition X2 of AlX2Ga1-x2N barrier layer by the side of a substrate in double hetero structure. In addition, by using double hetero structure, compared with single hetero structure, it is enabled to confine an electron in a channel layer a substrate and substrate front-face side to a channel layer using both piezo charges, and the effect of being effectively reducible also has electron-distribution width of face. In addition, since the sign of the piezo charge by which an induction is carried out depending on the size relation of a lattice constant by the interface of **** of substrate front-face side ** and a channel layer and the interface of the barrier layer by the side of a substrate and a channel layer is reverse, that difference will arise [the location an electron can draw near and an electron distribution carries out / the location / a localization by both size relation] a substrate front-face and substrate side. And in order to carry out the localization of the electron distribution by the substrate front-face side and to maintain the control by the gate electrode at a more effective domain, it is important to keep large the piezo charge by the side of a substrate front face. For that purpose, it is required for the composition difference (x1-x2) of aluminum composition (X1) of the barrier layer by the side of a substrate front face and aluminum composition (X2) of the barrier layer by the side of a substrate to be positive. Drawing 7 shows an operation of the potential structure of double hetero structure HEMT " $\text{AlX1Ga1-x1N/GaN/AlX2Ga1-x2N HEMT}$ " ($0 < x2 < x1 \leq 1$) by this invention based on the above-mentioned argument. Drawing 7 being alike -- as a result of an electron's being able to draw near to a substrate front-face side by operation of the strong electric field by the piezo charge produced in the hetero interface of the both sides by the side of a substrate front face and a substrate, a mode that electron-distribution width of face is reduced, and the channel induction of a more high-concentration two-dimensional electron has become possible according to the high obstruction effect by the side of a substrate front face is shown. Therefore, by using the potential structure of double hetero structure HEMT " $\text{AlX1Ga1-x1N/GaN/AlX2Ga1-x2N HEMT}$ " ($0 < x1, x2 \leq 1$) by this invention of drawing 1, an aspect ratio is improved, it is enabled to increase a mutual conductance (gm), and implementation of highly efficient $\text{AlXGa1-XN/GaN HEMT}$ is attained. The result of the above-mentioned argument can be applied as it is, when InYGa1-YN ($0 < Y \leq 1$) is used instead of GaN as a channel layer. Drawing 8 is what showed the operation of the potential structure of double hetero structure HEMT " $\text{AlX1Ga1-x1N/InYGa1-YN/AlX2Ga1-x2N HEMT}$ " ($0 < x2 < x1 \leq 1, 0 < Y \leq 1$) by this invention, and the operation is completely the same as that of the operation shown in drawing 7. The gestalt of implementation of the following invention explains the layer-structure conditions for an operation of the potential structure by this invention shown in the drawing 7 and the drawing 8 being realized.

[0008]

[Embodiments of the Invention] The layer structure illustrated with the gestalt of the <gestalt 1 of operation> book operation is shown in drawing 9. The gestalt of this operation is $\text{AlX1Ga1-x1N/GaN/AlX2Ga1-x2N HEMT}$ ($0 < x2 < x1 \leq 1$) shown in drawing 1. In the gestalt of this operation, although sapphire, SiC (silicon carbide), etc. can be used and GaN and AlGaN can be used as a buffer layer as a substrate, it is not restricted to this. It can get down to using the layer structure of the gestalt of this operation, and an aspect ratio can produce highly efficient high, high HEMT of a mutual conductance.

[0009] The gestalt of another operation of the <gestalt 2 of operation> this invention is shown. $\text{AlX1Ga1-x1N/GaN/AlX2Ga1-x2N}$ shown in drawing 10 In the layer structure ($0 < x2 < x1 \leq 1$) of HEMT The thickness dB1 of AlX1Ga1-x1N barrier layer by the side of difference x1-x2 and the substrate front face of the aluminum composition X1 of AlX1Ga1-x1N barrier layer by the side of a substrate front face and the aluminum composition X2 of AlX2Ga1-x2N barrier layer by the side of a substrate The same effect as the gestalt 1 of operation is acquired by using the structure which is shown in drawing 11 and which exists in the layer-structure condition field surrounded by line A, line B, line C, line D, and curvilinear E. Here, since 10% is required as aluminum composition in order for the limitation of line A to acquire effectively the effect as an obstruction of the barrier layer by the side of a

substrate, the upper limit of aluminum composition of the barrier layer by the side of a substrate front face becomes settled to 90%. Moreover, if, as for the limitation of line D, the thickness of the barrier layer by the side of the substrate front face as a gate insulator layer exceeds 500**, since it stops acquiring the concentration-of-electrons modulation effect by impressing potential to a gate electrode effectively, the thickness of the barrier layer by the side of a substrate front face will become settled below 500**. Furthermore, the limitation of curvilinear E becomes settled from the request of maintaining the thickness of a channel layer and the barrier layer by the side of a substrate front face at the domain from which grid relief does not happen.

[0010] The gestalt of another operation of the <gestalt 3 of operation> this invention is shown in drawing 12. The gestalt of this operation is $\text{AlX1Ga1-x1N/InYGa1-YN/AlX2Ga1-x2N}$ HEMT ($0 < x2 < x1 \leq 1$, $0 < Y \leq 1$) shown in drawing 2. In the gestalt of this operation, although sapphire, SiC, etc. can be used and GaN and AlGaN can be used as a buffer layer as a substrate, it is not restricted to these. It can get down to using the layer structure of the gestalt of this operation, and an aspect ratio can produce highly efficient high, high HEMT of a mutual conductance. In addition, In composition of InGaAs layer cannot be overemphasized by that it can set up suitably besides this example.

[0011] The gestalt of another operation of the <gestalt 4 of operation> this invention is shown. $\text{AlX1Ga1-x1N/InYGa1-YN/AlX2Ga1-x2N}$ shown in drawing 13 In the layer structure ($0 < x2 < x1 \leq 1$, $0 < Y \leq 1$) of HEMT The thickness dB1 of AlX1Ga1-x1N barrier layer by the side of difference $x1-x2$ and the substrate front face of the aluminum composition X1 of AlX1Ga1-x1N barrier layer by the side of a substrate front face and the aluminum composition X2 of AlX2Ga1-x2N barrier layer by the side of a substrate front face By using the structure which exists in the layer-structure condition field shown in drawing 11, the same effect as the gestalt 2 of operation is acquired.

[0012]

[Effect of the Invention] An aspect ratio is high and it is effective in the ability of a mutual conductance (gm) to realize highly efficient high AlXGa1-XN/GaN HEMT and highly efficient AlXGa1-XN/InYGa1-YN HEMT with the HEMT which has the double hetero structure which this invention mentioned above.

AlX1Ga1-x1N/InYGa1-YN

AlX1Ga1-x1N/InYGa1-YN

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-274474

(43) 公開日 平成11年(1999)10月8日

(51) Int.Cl.⁶

識別記号

F I

H 0 1 L 29/778

H 0 1 L 29/80

H

21/338

33/00

C

29/812

H 0 1 S 3/18

33/00

H 0 1 S 3/18

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L (全 9 頁)

(21) 出願番号

特願平10-69617

(22) 出願日

平成10年(1998)3月19日

(71) 出願人 000004226

日本電信電話株式会社

東京都千代田区大手町二丁目3番1号

(72) 発明者 前田 就彦

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本
電信電話株式会社内

(72) 発明者 小林 直樹

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本
電信電話株式会社内

(72) 発明者 西田 敏夫

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本
電信電話株式会社内

(74) 代理人 弁理士 中村 純之助 (外2名)

(54) 【発明の名称】 半導体装置

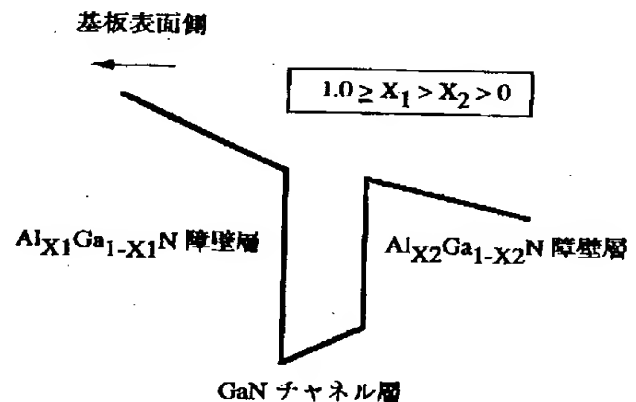
(57) 【要約】

【課題】 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ ヘテロ構造を有する HEMT において、ヘテロ構造に付随して生じる大きなピエゾ電界効果をデバイス設計において考慮し、この効果を有効に利用した新しいデバイス構造によって、ヘテロ構造チャンネルを有する超高出力・超高耐圧の高速高周波用の化合物半導体よりなる電界効果トランジスタの高性能化をはかる。

【解決手段】 基板上に作製した $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる基板側の障壁層、 GaN もしくは InGaN からなるチャンネル層、および $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる基板表面側の障壁層を含んで構成されるダブルヘテロ構造を有する高電子移動度トランジスタにおいて、基板表面側の障壁層の Al 組成を、基板側の障壁層の Al 組成よりも大きく構成した半導体装置とする。また、チャンネル層および基板表面側の障壁層の膜厚は格子緩和を生じない範囲とする。

図 1

$\text{Al}_{X_1}\text{Ga}_{1-X_1}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{X_2}\text{Ga}_{1-X_2}\text{N}$ HEMT
のポテンシャル構造



【特許請求の範囲】

【請求項1】基板上に作製した $Al_xGa_{1-x}N$ からなる基板側の障壁層、 GaN もしくは $InGaN$ からなるチャネル層、および $Al_xGa_{1-x}N$ からなる基板表面側の障壁層を含んで構成されるダブルヘテロ構造を有する高電子移動度トランジスタにおいて、上記基板表面側の障壁層の Al 組成を、上記基板側の障壁層の Al 組成よりも大きく構成したことを特徴とする半導体装置。

【請求項2】請求項1において、チャネル層および基板表面側の障壁層の膜厚は格子緩和を生じない範囲であることを特徴とする半導体装置。

【請求項3】請求項1または請求項2において、 $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}N/GaN/Al_{x_2}Ga_{1-x_2}N$ HEMTの層構造 ($0 < x_2 < x_1 \leq 1$) のダブルヘテロ構造を有する高電子移動度トランジスタであって、基板表面側の $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}N$ 障壁層の Al 組成 X_1 と、基板側の $Al_{x_2}Ga_{1-x_2}N$ 障壁層の Al 組成 X_2 との Al 組成差 ($X_1 - X_2$) が0.9以下、基板表面側の $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}N$ 障壁層の層厚 (d_{B1}) が500Å以下であり、かつ上記基板表面側の $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}N$ 障壁層の膜厚は格子緩和が生じない範囲である層構造条件領域内にあることを特徴とする半導体装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、ヘテロ構造チャネルを有する超高出力・超高耐圧の高速高周波用の化合物半導体よりなる電界効果トランジスタに関する。

【0002】

【従来の技術】 $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ ヘテロ構造を有する高電子移動度トランジスタ (HEMT) 「 $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ HEMT」は、 $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ ヘテロ構造における大きな伝導帯不連続 (Al 組成 X_1 1.0で約2.1 eV) によって高い2次元電子濃度が得られ、かつ、チャネル層となる GaN の衝突電離エネルギーが高い (約5.3 eV) ため、 $GaAs$ 系HEMTを凌駕する高出力・高耐圧動作が可能である。ここにおいて、 $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ ヘテロ構造においては、 $Al_xGa_{1-x}N$ 層と GaN 層との間の格子不整合に起因する非常に大きなピエゾ電界効果が存在する。このため、 $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ HEMTのさらなる高性能化のためには、デバイス設計においてピエゾ電界効果を考慮することが不可欠であり、また、この効果を利用した新しいHEMTデバイス構造の実現が必要とされている。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】本発明の目的は、 $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ ヘテロ構造を有するHEMTにおいて、該ヘテロ構造に付随して生じる大きなピエゾ電界効果をデバイス設計において考慮し、この効果を有効に利用した新しいデバイス構造によって、ヘテロ構造チャネ

ルを有する超高出力・超高耐圧の高速高周波用の化合物半導体よりなる電界効果トランジスタの高性能化をはかるところにある。

【0004】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、本発明は特許請求の範囲に記載のような構成とするものである。すなわち、本発明は、請求項1に記載のように、基板上に作製した $Al_xGa_{1-x}N$ からなる基板側の障壁層、 GaN もしくは $InGaN$ からなるチャネル層、および $Al_xGa_{1-x}N$ からなる基板表面側の障壁層を含んで構成されるダブルヘテロ構造を有する高電子移動度トランジスタにおいて、上記基板表面側の障壁層の Al 組成を、上記基板側の障壁層の Al 組成よりも大きく構成した半導体装置とするものである。このように本発明は、ダブル・ヘテロ構造における基板表面側および基板側の双方の $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ 、または $Al_xGa_{1-x}N/InGaN$ ヘテロ界面におけるピエゾ効果を用いて、 GaN または $InGaN$ チャネル内の2次元電子分布幅を有効に縮小し、かつ、基板表面側の $Al_xGa_{1-x}N$ 層の Al 組成 X を増大することによって、上記チャネル幅の縮小に伴う電子濃度の減少を阻止あるいは電子濃度を増大させることができるので、その結果、電子分布幅の小さい高濃度2次元電子を有するHEMTが実現でき、アスペクト比が高く、相互コンダクタンス (g_m) の高い高性能HEMTが得られる効果がある。

また、本発明は請求項2に記載のように、請求項1において、チャネル層および基板表面側の障壁層の膜厚は格子緩和を生じない範囲とした半導体装置とするものである。このように、チャネル層および基板表面側の障壁層の膜厚を格子緩和が生じない膜厚に設定することにより、ピエゾ電荷の効果が効果的に得られ、高性能HEMTを実現できる効果がある。また、本発明は請求項3に記載のように、請求項1または請求項2において、基板表面側の障壁層の Al 組成と、基板側の障壁層の Al 組成との組成差と、上記基板表面側の障壁層の膜厚との組合せ条件が、図11に示される線A、線B、線C、線Dおよび曲線Eで囲まれる範囲の層構造条件領域内にある半導体装置とするものである。このように、図11に示される層構造条件領域を用いることにより、アスペクト比が高く、相互コンダクタンス (g_m) の高い高性能HEMTを容易に高歩留まりで作製できる効果がある。

【0005】図11は、本発明の $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}N/GaN/Al_{x_2}Ga_{1-x_2}N$ HEMTの層構造 ($0 < x_2 < x_1 \leq 1$) における層構造条件領域を示すものであって、縦軸に基板表面側の $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}N$ 障壁層の Al 組成 X_1 と、基板側の $Al_{x_2}Ga_{1-x_2}N$ 障壁層の Al 組成 X_2 との Al 組成差 ($X_1 - X_2$) をとり、横軸に基板表面側の $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}N$ 障壁層の層厚 (d_{B1}) をとった直角座標系において、縦軸の Al 組成差 ($X_1 - X_2$) 0.9と横軸の障壁層の層厚 (d_{B1}) 100Åとの交差

点(a)までの線分Aと、上記交差点(a)から、縦軸のAl組成差($X_1 - X_2$)0.2と横軸の障壁層の層厚(d_{H1})500Åとの交差点(b)までの上記障壁層の層厚(d_{H1})の格子緩和の限界を示す曲線Eと、上記交差点(b)から横軸上までの垂直の線分Dと、縦軸の0.9までの線分Bおよび横軸の500Åまでの線分Cで囲まれる層構造条件領域内に存在する構造を用いるものである。

【0006】本発明の $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ HEMTにおいて、さらなる高性能化のためには、チャネル内の2次元電子ガスの分布幅を縮小することにより、アスペクト比を向上し、相互コンダクタンス(g_m)を増大することが有効であり、そのためには幅の狭いGaNチャネル層を、2つの $Al_xGa_{1-x}N$ 障壁層で挟み込んだダブル・ヘテロ構造を用いることが有利である。しかし、チャネル幅の縮小は、一般にチャネルに誘起可能な2次元電子濃度の減少を導いてしまうので、GaNチャネル幅の縮小を行う際には、 $Al_xGa_{1-x}N$ 障壁層のAl組成Xを増大することによりヘテロ界面の伝導帯不連続をより大きくすることによって、上記電子濃度の減少を阻止あるいは電子濃度の増大をはかることが有効である。一方、 $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ ヘテロ構造においては、 $Al_xGa_{1-x}N$ 層とGaN層との間の格子歪に起因する非常に大きなピエゾ電界効果が存在し、格子緩和が全く生じていない場合には、Al組成 $X=1.0$ において $3 \times 10^{13}/cm^2$ という極めて大きな正あるいは負のピエゾ電荷がヘテロ界面に生じる。このため、 $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ HEMTの設計を行う際には、通常のシングル・ヘテロ構造HEMTの場合であっても、上記のダブル・ヘテロ構造HEMTの場合であっても、いずれの場合でもピエゾ電界効果を考慮に入れることが不可欠である。本発明は、ダブル・ヘテロ構造における基板表面側および基板側の双方の $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ ヘテロ界面におけるピエゾ効果を用いて、GaNチャネル内の2次元電子分布幅を有効に縮小し、かつ、基板表面側の $Al_xGa_{1-x}N$ 層のAl組成Xを増大することによって、GaNチャネル幅の縮小に伴う電子濃度の減少を阻止あるいは電子濃度を増大し、その結果、電子分布幅の小さい高濃度2次元電子を有する高性能 $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ HEMTを実現し、上記課題を解決するものである。

【0007】図1および図2に、本発明によるダブル・ヘテロ構造HEMTのポテンシャル構造の概念図を示す。図1は、本発明によるダブル・ヘテロ構造HEMT「 $Al_{x1}Ga_{1-x1}N/GaN/Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ HEMT」($0 < X_1, X_2 \leq 1$)のポテンシャル構造の概念図である。図1のポテンシャル構造の基本的な特徴は、GaNチャネル層が隣接する2つの障壁層界面のいずれにおいても格子歪による大きなピエゾ電界効果が存在する点、および、基板表面側の $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ 障壁層の

Al組成 X_1 が基板側の $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ 障壁層のAl組成 X_2 よりも大きい点、である。図2は、本発明によるダブル・ヘテロ構造HEMT「 $Al_{x1}Ga_{1-x1}N/In_yGa_{1-y}N/Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ HEMT」($0 < X_1, X_2 \leq 1, 0 < Y \leq 1$)のポテンシャル構造の概念図で、図1に示した本発明を、チャネル層として $In_yGa_{1-y}N$ ($0 < Y \leq 1$)を用いた場合に適用したものである。図2のポテンシャル構造の基本的特徴は、図1のポテンシャル構造の基本的特徴と全く同じである。上記図1および図2で示した本発明によるポテンシャル構造の作用を、図3～図8を用いて説明する。まず、本発明におけるピエゾ電界効果の作用を、図3および図4を用いて説明する。図3は、仮想的にピエゾ電界効果が全く存在しないとした場合のダブル・ヘテロ構造 $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_xGa_{1-x}N$ HEMTのポテンシャル形状と2次元電子の分布の様子を模式的に示したものである。図3には、チャネル層幅の縮小によって電子分布幅が縮小されうるという点で、ダブル・ヘテロ構造HEMTが通常のシングル・ヘテロ構造HEMTに比べて有利である様子が示されている。図4は、GaNチャネル層が隣接する2つの障壁層界面のいずれにおいても格子歪による大きなピエゾ電界効果が存在する場合のダブル・ヘテロ構造 $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_xGa_{1-x}N$ HEMTのポテンシャル形状と2次元電子の分布の様子を模式的に示したものである。図4には、基板表面側ヘテロ界面に生じた正のピエゾ電荷および基板側ヘテロ界面に生じた負のピエゾ電荷の双方による強い電界によって、電子が基板表面側に引き寄せられる結果、電子分布幅が縮小される様子が示されている。このように、ダブル・ヘテロ構造によりピエゾ電界効果を効果的に用いることによって、2次元電子の分布幅の縮小を促進することが可能である。基板に対し格子不整合が存在する薄膜を形成する場合に、膜厚を増大させると、いわゆる臨界膜厚を境にしてそれ以上で基板と薄膜の界面にミスフィット転位が発生し、格子緩和が生じるが、一般に格子緩和は不完全に進行し、一定の格子歪が残存する。したがって、臨界膜厚を越えた膜厚を採用しても、本願発明の技術思想に基づいてピエゾ電荷の効果を得ることができるが、より効果的には、チャネル層および基板表面側の障壁層の膜厚を、臨界膜厚以下に抑えることが望ましい。次に、本発明における基板表面側 $Al_xGa_{1-x}N$ 障壁層の障壁効果の作用を、図5および図6を用いて示す。図5は、ピエゾ電界効果が存在する場合のシングル・ヘテロ構造 $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ HEMTにおいて、 $Al_xGa_{1-x}N$ 障壁層のAl組成Xを増大した時のポテンシャル形状の変化を模式的に示したもので、Al組成Xの増大によって、より高濃度の2次元電子が誘起可能なように $Al_xGa_{1-x}N$ 障壁を高くすることができる様子が示されている。図5においては、 $Al_xGa_{1-x}N$ 障壁層のAl組成Xが、臨界値 X_{Hb} まで

10

20

30

40

50

は $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ ヘテロ界面にミスフィット転位が導入されることなく増加可能であるとしている。図6は、ダブル・ヘテロ構造 $\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2}\text{N}$ HEMTにおいて、基板表面側の $\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}$ 障壁層の Al 組成 X を $X_1 \sim X_2 \sim X_L$ から $X_1 = X_{HD}$ まで図5における臨界値 $X = X_{HS}$ ($X_{HS} < X_{HD}$)を経て増大させた時のポテンシャル形状の変化を模式的に示したものである。図6には、ダブル・ヘテロ構造における GaN 層の結晶格子が基板側の $\text{Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2}\text{N}$ 層によって歪んでいるために、基板表面側の $\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}$ 障壁層の Al 組成 X_1 を図5のシングル・ヘテロ構造における臨界値 $X = X_{HS}$ よりも大きくして $X_2 = X_{HD} > X_{HS}$ のようにすることが可能である様子が示されている。このように、ダブル・ヘテロ構造において基板表面側の $\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}$ 障壁層の Al 組成 X_1 を基板側の $\text{Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2}\text{N}$ 障壁層の Al 組成 X_2 より大きくすることによって、 GaN チャネル層の2次元電子に対するより高い障壁効果を実現することが可能である。加えて、ダブル・ヘテロ構造を用いることにより、シングル・ヘテロ構造に比べ、チャネル層に対して基板側および基板表面側両方のピエゾ電荷を利用して、電子をチャネル層に閉じ込めることが可能となり、電子分布幅を有効に縮小できるという効果も有する。なお、格子定数の大小関係に依存して、基板表面側障壁層およびチャネル層の界面と、基板側の障壁層およびチャネル層の界面とで、誘起されるピエゾ電荷の符号が逆であることから、両者の大小関係により、電子が引き寄せられて電子分布が局在する場所が、基板表面側か基板側かの違いが生じてしまう。そして、電子分布を基板表面側により局在させてゲート電極による制御を、より効果的な範囲に保つためには、基板表面側のピエゾ電荷を大きく保つことが重要である。そのためには、基板表面側の障壁層の Al 組成 (X_1) と基板側の障壁層の Al 組成 (X_2) との組成差 ($X_1 - X_2$) が正であることが必要である。図7は、本発明によるダブル・ヘテロ構造HEMT「 $\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2}\text{N}$ HEMT」 ($0 < X_2 < X_1 \leq 1$) のポテンシャル構造の作用を、上記議論に基づいて示したものである。図7には、基板表面側および基板側の双方のヘテロ界面に生じたピエゾ電荷による強い電界の作用によって電子が基板表面側に引き寄せられる結果、電子分布幅が縮小され、かつ、基板表面側の高い障壁効果によってより高濃度の2次元電子がチャネル誘起可能になっている様子が示されている。したがって、図1の本発明によるダブル・ヘテロ構造HEMT「 $\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2}\text{N}$ HEMT」 ($0 < X_1, X_2 \leq 1$) のポテンシャル構造を用いることによって、アスペクト比を向上し、相互コンダクタンス (g_m) を増大することが可能となり、高性能な $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMTの実現が可能となる。上記議論の結果は、チャネル層とし

て GaN の代わりに $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ($0 < Y \leq 1$) を用いた場合にも、そのまま適用することが可能である。図8は、本発明によるダブル・ヘテロ構造HEMT「 $\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2}\text{N}$ HEMT」 ($0 < X_2 < X_1 \leq 1, 0 < Y \leq 1$) のポテンシャル構造の作用を示したもので、その作用は図7に示された作用と全く同じである。図7および図8に示された本発明によるポテンシャル構造の作用が実現されるための層構造条件については、以下の発明の実施の形態で説明する。

【0008】

【発明の実施の形態】〈実施の形態1〉本実施の形態で例示する層構造を図9に示す。本実施の形態は、図1に示した $\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2}\text{N}$ HEMT ($0 < X_2 < X_1 \leq 1$) である。本実施の形態において、基板としてはサファイアやSiC (炭化ケイ素) 等を用いることができ、バッファ層としては GaN や AlGaN を用いることができるが、これに限られるものではない。本実施の形態の層構造を用いることにより、アスペクト比が高く相互コンダクタンスの高い高性能なHEMTを作製することができる。

【0009】〈実施の形態2〉本発明の別の実施の形態を示す。図10に示した $\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2}\text{N}$ HEMTの層構造 ($0 < X_2 < X_1 \leq 1$) において、基板表面側の $\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}$ 障壁層の Al 組成 X_1 と、基板側の $\text{Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2}\text{N}$ 障壁層の Al 組成 X_2 との差 $X_1 - X_2$ 、および基板表面側の $\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}$ 障壁層の層厚 d_{B1} とが、図11に示される、線A、線B、線C、線Dおよび曲線Eに囲まれる層構造条件領域内に存在する構造を用いることにより、実施の形態1と同様の効果が得られる。ここで、線Aの限界は、基板側の障壁層の障壁としての効果を有効に得るためには、 Al 組成として10%が必要であることから、基板表面側の障壁層の Al 組成の上限値は90%に定まる。また、線Dの限界は、ゲート絶縁膜としての基板表面側の障壁層の膜厚が500Åを超えると、ゲート電極に電位を印加することによる電子濃度変調効果が有効に得られなくなることから、基板表面側の障壁層の膜厚は500Å以下と定まる。さらに、曲線Eの限界は、格子緩和が起こらない範囲にチャネル層および基板表面側の障壁層の膜厚を保つという要請から定まる。

【0010】〈実施の形態3〉本発明の別の実施の形態を図12に示す。本実施の形態は、図2に示した $\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2}\text{N}$ HEMT ($0 < X_2 < X_1 \leq 1, 0 < Y \leq 1$) である。本実施の形態において、基板としては、サファイアやSiC等を用いることができ、バッファ層としては GaN や AlGaN を用いることができるが、これらに限られるものではない。本実施の形態の層構造を用いることにより、アスペクト比が高く相互コンダクタンスの高い高性能なHEMTを作製することができる。

能なHEMTを作製することができる。なお、InGaAs層のIn組成は、この例以外にも適宜設定できることは言うまでもない。

【0011】〈実施の形態4〉本発明の別の実施の形態を示す。図13に示した $Al_{x1}Ga_{1-x1}N/InyGa_{1-y}N/Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ HEMTの層構造 ($0 < X_2 < X_1 \leq 1$ 、 $0 < Y \leq 1$) において、基板表面側の $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ 障壁層のAl組成 X_1 と基板表面側の $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ 障壁層のAl組成 X_2 との差 $X_1 - X_2$ 、および基板表面側の $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ 障壁層の層厚 d_{B1} とが、図11に示される層構造条件領域内に存在する構造を用いることにより、実施の形態2と同様の効果が得られる。

【0012】

【発明の効果】本発明の上述したダブルヘテロ構造を有する高電子移動度トランジスタによって、アスペクト比が高く、相互コンダクタンス (g_m) が高い高性能な $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ HEMTおよび高性能 $Al_xGa_{1-x}N/InyGa_{1-y}N$ HEMTを実現できる効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施の形態で例示した $Al_{x1}Ga_{1-x1}N/GaN/Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ HEMT ($0 < X_2 < X_1 \leq 1$) のポテンシャル構造図。

【図2】本発明の実施の形態で例示した $Al_{x1}Ga_{1-x1}N/InyGa_{1-y}N/Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ HEMT ($0 < X_2 < X_1 \leq 1$ 、 $0 < Y \leq 1$) のポテンシャル構造図。

【図3】本発明のHEMTの作用を説明するためのポテンシャル構造図。

【図4】本発明のHEMTの作用を説明するためのポテンシャル構造図。

【図5】本発明のHEMTの作用を説明するためのポテンシャル構造図。

【図6】本発明のHEMTの作用を説明するためのポテンシャル構造図。

【図7】本発明のHEMTの作用を説明するためのポテンシャル構造図。

【図8】本発明のHEMTの作用を説明するためのポテンシャル構造図。

【図9】本発明の実施の形態1で例示したダブルヘテロ構造のHEMTの模式図。

【図10】本発明の実施の形態2で例示したダブルヘテロ構造のHEMTの模式図。

【図11】本発明の実施の形態2および4で例示したダブルヘテロ構造のHEMTの層構造条件領域を示す図。

【図12】本発明の実施の形態3で例示したダブルヘテロ構造のHEMTの模式図。

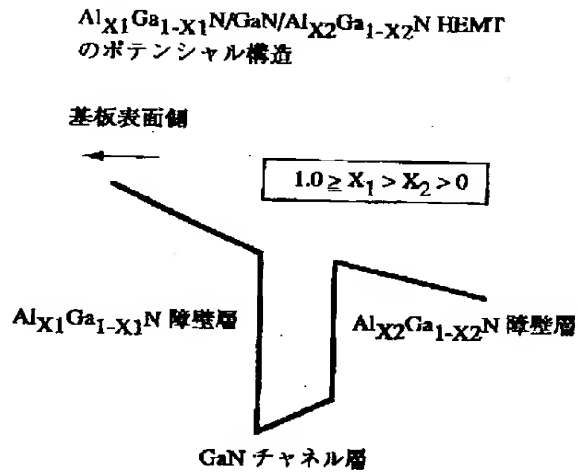
【図13】本発明の実施の形態4で例示したダブルヘテロ構造のHEMTの模式図。

【符号の説明】

- 1…基板
- 2…バッファ層
- 3… $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$ 障壁層
- 4…GaNチャネル層
- 5… $Al_{0.15}Ga_{0.85}N$ 障壁層
- 6…基板
- 7…バッファ層
- 8… $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ 障壁層
- 9…GaNチャネル層
- 10… $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ 障壁層
- 11…基板
- 12…バッファ層
- 13… $Al_{0.15}Ga_{0.85}N$ 障壁層
- 14… $In_{0.05}Ga_{0.95}N$ チャネル層
- 15… $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$ 障壁層
- 16…基板
- 17…バッファ層
- 18… $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ 障壁層
- 19… $InyGa_{1-y}N$ チャネル層
- 20… $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ 障壁層

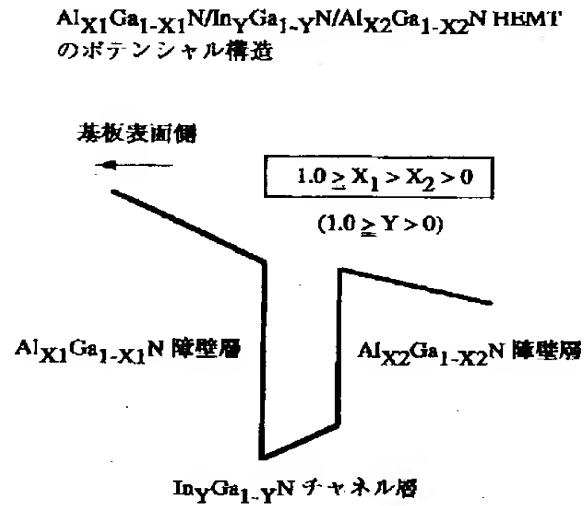
【図1】

図1



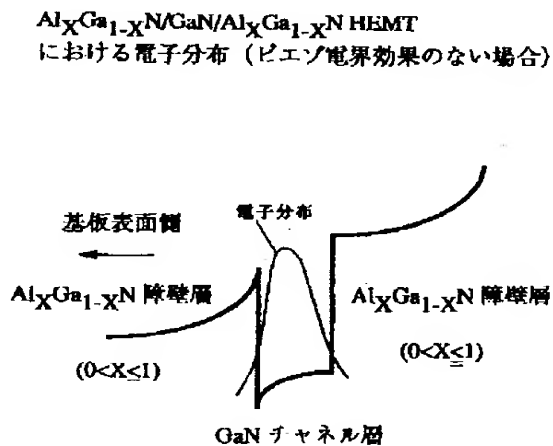
【図2】

図2



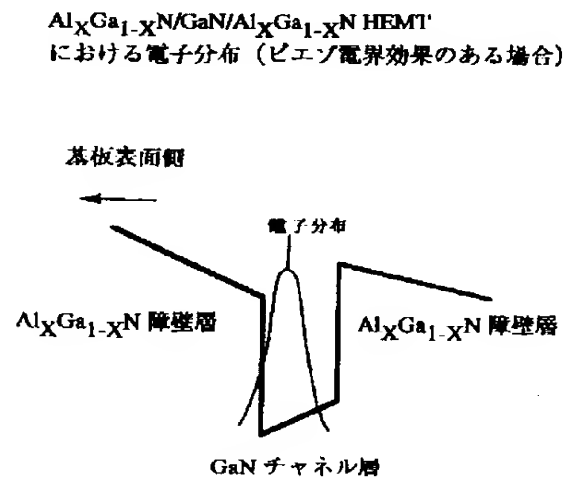
【図3】

図3



【図4】

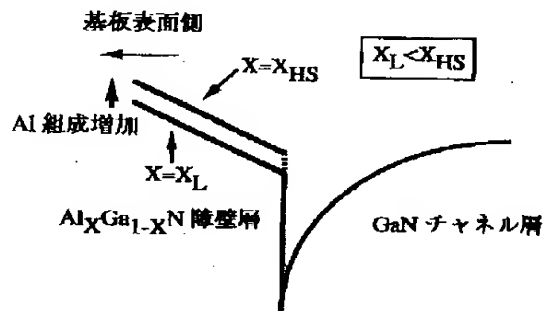
図4



【図5】

図 5

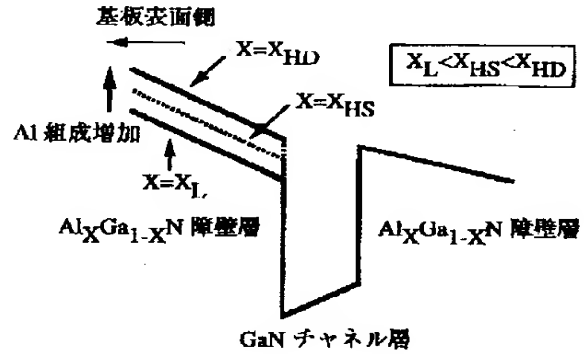
Al 組成の増加による障壁高の増大
($\text{Al}_X\text{Ga}_{1-X}\text{N}/\text{GaN}$ シングル・ヘテロ構造)



【図6】

図 6

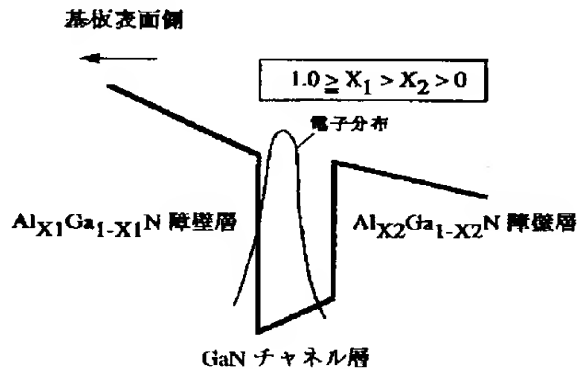
Al 組成の増加による障壁高の増大
($\text{Al}_X\text{Ga}_{1-X}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_X\text{Ga}_{1-X}\text{N}$ ダブル・ヘテロ構造)



【図7】

図 7

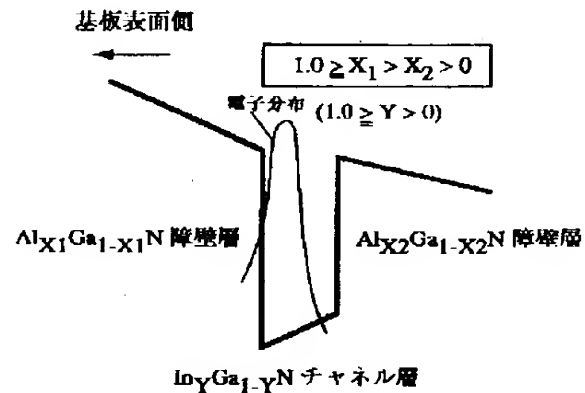
$\text{Al}_{X1}\text{Ga}_{1-X1}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{X2}\text{Ga}_{1-X2}\text{N}$ HEMT
における高濃度電子の分布



【図8】

図 8

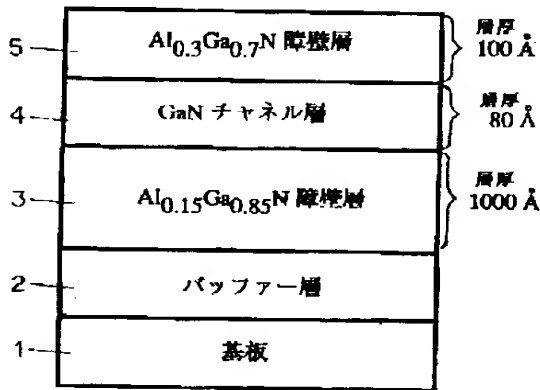
$\text{Al}_{X1}\text{Ga}_{1-X1}\text{N}/\text{In}_Y\text{Ga}_{1-Y}\text{N}/\text{Al}_{X2}\text{Ga}_{1-X2}\text{N}$ HFMT
における高濃度電子の分布



【図9】

図9

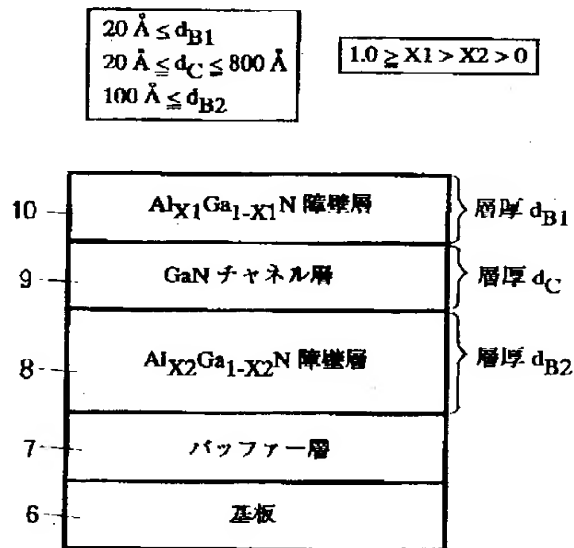
$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$
ダブル・ヘテロ構造 HEMT



【図10】

図10

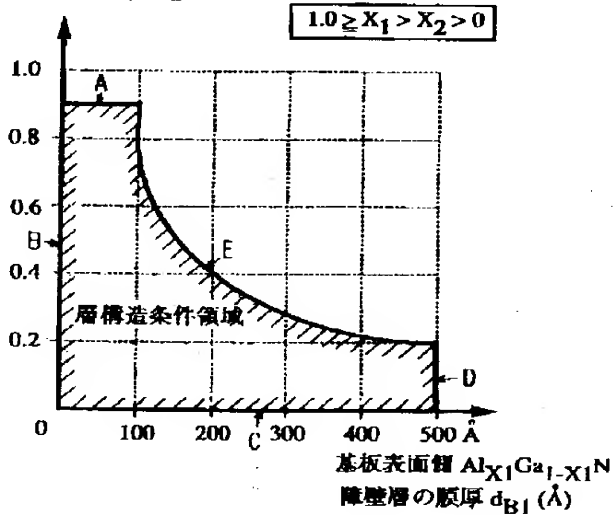
$\text{Al}_{X1}\text{Ga}_{1-X1}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{X2}\text{Ga}_{1-X2}\text{N}$
ダブル・ヘテロ構造 HEMT



【図11】

図11

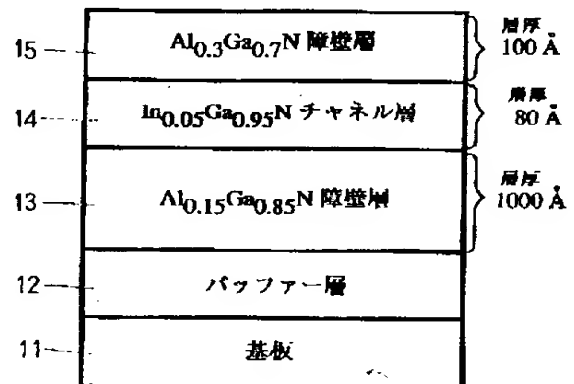
$\text{Al}_X\text{Ga}_{1-X}\text{N}$ 障壁層の
Al 組成差 $X_1 - X_2$



【図12】

図12

$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$
ダブル・ヘテロ構造 HEMT



【図13】

図13

$\text{Al}_{X1}\text{Ga}_{1-X1}\text{N}/\text{In}_Y\text{Ga}_{1-Y}\text{N}/\text{Al}_{X2}\text{Ga}_{1-X2}\text{N}$
ダブル・ヘテロ構造 HEMT

$20 \text{ \AA} \leq d_{B1}$ $20 \text{ \AA} \leq d_C \leq 800 \text{ \AA}$ $100 \text{ \AA} \leq d_{B2}$	$1.0 > X1 > X2 > 0$ $(1.0 \geq Y > 0)$
---	---

